

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-147454

(P2002-147454A)

(43) 公開日 平成14年5月22日 (2002.5.22)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テ-マ-ト\* (参考)

F 1 6 C 32/04

F 1 6 C 32/04

A 3 H 0 2 2

F 0 4 D 19/04

F 0 4 D 19/04

A 3 H 0 3 1

29/04

29/04

H 3 J 0 4 8

M 3 J 1 0 2

P

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 11 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願2000-347708(P2000-347708)

(22) 出願日

平成12年11月15日 (2000. 11. 15)

(71) 出願人 000002325

セイコーインスツルメンツ株式会社

千葉県千葉市美浜区中瀬1丁目8番地

(72) 発明者 川島 敏明

千葉県習志野市屋敷4丁目3番1号 セイ

コー精機株式会社内

(74) 代理人 100079212

弁理士 松下 義治

Fターム(参考) 3H022 AA01 BA06 CA16 DA09 DA11

3H031 DA02 EA07 EA12 FA13

3J048 AB08 AB15 CB22 EA08

3J102 AA01 BA03 BA19 CA02 DA02

DA03 DA09 DB05 DB10 DB11

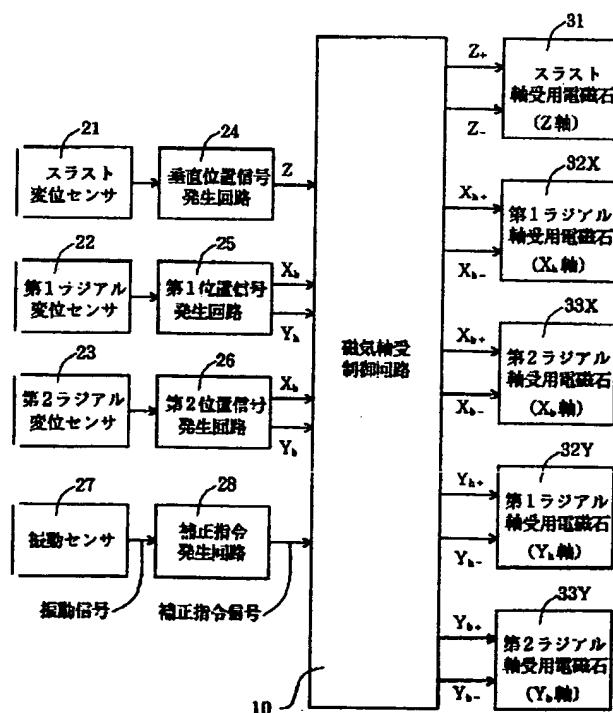
DB18 DB37 GA06

(54) 【発明の名称】 磁気軸受装置を備える回転機械

(57) 【要約】

【課題】 能動型磁気軸受装置を備える回転機械において、磁気軸受から或る程度離れた場所の振動を低減すること。

【解決手段】 能動型磁気軸受装置を備える回転機械において、利用装置と前記回転機械との接続部に振動センサ27を設置し、この振動センサ27からの振動信号に基づいて位置補正指令発生回路28により位置補正指令信号を発生させ、この位置補正指令信号を前記能動型磁気軸受装置の磁気軸受制御回路10の位相補償回路の入力側に加えて振動フィードバック制御を行い、前記振動を打消すように構成した。又は、振動センサ27からの振動信号に基づいて力補正指令発生回路28により力補正指令信号を発生させ、この力補正指令信号を前記能動型磁気軸受装置の磁気軸受制御回路10の位相補償回路の出力側に加えて振動フィードバック制御を行い、前記振動を打消すように構成した。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくとも一対の電磁石を備えたステータ、前記電磁石の磁気吸引力の平衡によって空中に保持されるロータ、前記ロータの位置を検出する位置センサとからなる磁気軸受と、前記位置センサからの位置信号に基づいてロータを定位置に戻すように前記電磁石の励磁電流を制御する磁気軸受制御回路とから構成された磁気軸受装置を備える回転機械において、利用装置と前記回転機械との接続部に振動センサを設置し、前記振動センサからの振動信号に基づいて位置補正指令信号を発生させ、これを前記磁気軸受制御回路の位相補償回路の入力側に加えて振動フィードバック回路を形成し、前記振動を打消すようにしたことを特徴とする磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項2】 少なくとも一対の電磁石を備えたステータ、前記電磁石の磁気吸引力の平衡によって空中に保持されるロータ、前記ロータの位置を検出する位置センサとからなる磁気軸受と、前記位置センサからの位置信号に基づいてロータを定位置に戻すように前記電磁石の励磁電流を制御する磁気軸受制御回路とから構成された磁気軸受装置を備える回転機械において、利用装置と前記回転機械との接続部に振動センサを設置し、前記振動センサからの振動信号に基づいて力補正指令信号を発生させ、これを前記磁気軸受制御回路の位相補償回路の出力側に加えて振動フィードバック回路を形成し、前記振動を打消すようにしたことを特徴とする磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項3】 前記位置補正指令信号は、振動／変位変換回路、変位信号から位置信号を演算する演算回路、パラメータ記憶部、及び前記演算回路が出力する制御軸毎の位置信号のゲインを調整する制御軸数のゲイン調整回路を少なくとも含んで構成され、且つ前記パラメータ記憶部は前記振動／変位変換回路に与える振動／変位変換用パラメータと前記演算回路に与える信号演算用パラメータが記憶されている補正指令信号発生回路によって発生させられるものであることを特徴とする請求項1の磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項4】 前記力補正指令信号は、振動信号から力信号を演算する演算回路、前記演算回路の信号演算のパラメータが記憶されたパラメータ記憶回路、前記演算回路が出力する位置信号のゲインを調整するゲイン調整回路、及び前記パラメータを決定し前記パラメータ記憶回路に記憶させるパラメータ決定手段とからなる力補正指令信号発生部を制御軸毎に設けて構成され、更に、これら力補正指令信号発生部を制御するシーケンス回路が付加されて構成されたものであることを特徴とする請求項2の磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項5】 前記パラメータ決定手段は、前記力補正指令信号発生部のゲイン調整回路の出力側に振動信号を加える信号加振器と、前記力補正指令信号発生部の入力

信号と出力信号とに基づいて前記パラメータを演算する伝達関数演算回路とから構成されていることを特徴とする請求項4の磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項6】 前記振動センサが、前記回転機械のフランジ部に設置されていることを特徴とする請求項1又は2の磁気軸受装置を備える回転機械。

【請求項7】 前記振動センサが、前記利用装置のフランジ部に設置されていることを特徴とする請求項1又は2の磁気軸受装置を備える回転機械。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、能動型磁気軸受装置を備えた真空ポンプ等の回転機械に関し、特に、前記回転機械の振動レベルを低減する能動型磁気軸受装置の制御方法に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】能動型磁気軸受装置を備える回転機械である磁気軸受式ターボ分子ポンプは、ころがり軸受を備えたターボ分子ポンプに比べて振動レベルが極めて低いという特徴を有する。この特徴及びその他の特徴から、磁気軸受式ターボ分子ポンプは半導体製造装置や電子顕微鏡に広く採用されている。ところで、近年、半導体製造装置や電子顕微鏡の性能或いは精度の維持向上に対する市場の要求が厳しくなり、これに伴って磁気軸受式ターボ分子ポンプの振動レベルの更なる低減が求められてきた。即ち、能動型磁気軸受装置を備える回転機械において、当該回転機械の振動レベルを更に低減するような能動型磁気軸受装置の制御方法が求められてきた。

【0003】特開昭60-220219号公報には、回転機械の振動レベルを更に低減するような能動型磁気軸受装置の制御方法が開示されている。この従来の能動型磁気軸受装置の制御方法は、少なくとも2個の振動検出器とそれに付加した狭帯域で高ゲインの選択フィードバックループを用いるものである。ところが、前記振動検出器は磁気軸受のステータを構成する電磁石の直近に配置されているため、磁気軸受のステータから或る程度離れた場所の振動を低減することはできないという問題を有している。例えば、電子顕微鏡に磁気軸受式ターボ分子ポンプを利用する場合、その磁気軸受のステータから離れたポンプのフランジ部の振動を低減することという要求に、従来の能動型磁気軸受装置の制御方法は応えることができないという問題があった。

【0004】要するに、能動型磁気軸受装置を備える回転機械と利用装置との接続部には磁気軸受のステータから伝えられた好ましくない振動が存在しているが、従来の能動型磁気軸受装置の制御方法ではこの振動を抑制することができないという問題があった。なお、この明細書で利用装置とは、回転機械が利用される電子顕微鏡などの装置をいう。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】本発明が解決しようとする課題は、能動型磁気軸受装置を備える回転機械において、磁気軸受から或る程度離れた場所、特に利用装置と前記回転機械との接続部の振動を低減することである。

【0006】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決する請求項1の発明を、少なくとも一対の電磁石を備えたステータ、前記電磁石の磁気吸引力の平衡によって空中に保持されるロータ、前記ロータの位置を検出する位置センサとからなる磁気軸受と、前記位置センサからの位置信号に基づいてロータを定位置に戻すように前記電磁石の励磁電流を制御する磁気軸受制御回路とから構成された磁気軸受装置を備える回転機械において、利用装置と前記回転機械との接続部に振動センサを設置し、前記振動センサからの振動信号に基づいて位置補正指令信号を発生させ、これを前記磁気軸受制御回路の位相補償回路の入力側に加えて振動フィードバック回路を形成し、前記振動を打消すように構成した。そして、前記振動センサは前記回転機械のフランジ部、又は利用装置のフランジ部に設置した。

【0007】また、前記位置補正指令信号は請求項3に記載する位置補正指令信号発生回路によって発生させられるものであって、前記位置補正指令信号発生回路は、振動／変位変換回路、変位信号から位置信号を演算する演算回路、パラメータ記憶部、及び前記演算回路が出力する制御軸毎の位置信号のゲインを調整する制御軸数のゲイン調整回路を少なくとも含んで構成されたものであって、且つ前記パラメータ記憶部には前記振動／変位変換回路に与える振動／変位変換用パラメータと前記演算回路に与える信号演算用パラメータが記憶されている。

【0008】上記課題を解決する請求項2の発明を、少なくとも一対の電磁石を備えたステータ、前記電磁石の磁気吸引力の平衡によって空中に保持されるロータ、前記ロータの位置を検出する位置センサとからなる磁気軸受と、前記位置センサからの位置信号に基づいてロータを定位置に戻すように前記電磁石の励磁電流を制御する磁気軸受制御回路とから構成された磁気軸受装置を備える回転機械において、利用装置と前記回転機械との接続部に振動センサを設置し、前記振動センサからの振動信号に基づいて力補正指令信号を発生させ、これを前記磁気軸受制御回路の位相補償回路の出力側に加えて振動フィードバック回路を形成し、前記振動を打消すように構成した。そして、前記振動センサは前記回転機械のフランジ部、又は利用装置のフランジ部に設置した。

【0009】また、前記位置補正指令信号は請求項4に記載する力補正指令信号発生回路によって発生させられるものであって、前記力補正指令信号発生回路は、振動信号から力信号を演算する演算回路、前記演算回路の信号演算のパラメータが記憶されたパラメータ記憶回路、

前記演算回路が出力する位置信号のゲインを調整するゲイン調整回路、及び前記パラメータを決定し前記パラメータ記憶回路に記憶させるパラメータ決定手段とからなる力補正指令信号発生部を制御軸毎に設けて構成されたものであって、これら力補正指令信号発生部を制御するシーケンス回路が付加されている。更に、前記パラメータ決定手段は、請求項5に記載する通り、前記力補正指令信号発生部に振動を加える信号加振器と、前記力補正指令信号発生部の入力信号と出力信号とに基づいて前記パラメータを演算する伝達関数演算回路とから構成されている。

【0010】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の一実施形態の磁気軸受装置を備える回転機械の制御部のブロック図である。即ち、図1において10は磁気軸受制御回路、21はスラスト変位センサ、22は第1ラジアル変位センサ、23は第2ラジアル変位センサ、24はスラスト変位センサ21の検出信号に基づいて垂直位置信号Zを発生する垂直位置信号発生回路、25は第1ラジアル変位センサ22の検出信号に基づいてX軸成分信号 $X_h$ とY軸成分信号 $Y_h$ を発生する第1位置信号発生回路、26は第2ラジアル変位センサ23の検出信号に基づいてX軸成分信号 $X_b$ とY軸成分信号 $Y_b$ を発生する第2位置信号発生回路である。

【0011】また、27は振動センサであり、28は振動センサ27が検出した振動信号に基づいて位置補正指令信号又は力補正指令信号を発生し、これを磁気軸受制御回路10に印加する補正指令発生回路である。

【0012】更に、31はスラスト軸受用電磁石、32Xは第1ラジアル軸受のX軸用電磁石、32Yは第1ラジアル軸受のY軸用電磁石、33Xは第2ラジアル軸受のX軸用電磁石、33Yは第2ラジアル軸受のY軸用電磁石である。

【0013】図2は、1つの振動信号に基づいて発生させられた補正指令信号が2つの位置補正指令信号である場合の制御部の一実施形態であり、図1の磁気軸受制御回路10の構成をより詳細に示したブロック回路図である。図2に示す如く、5軸制御用の磁気軸受制御回路10は、位相補償回路群11、極性変換器群12、パワーアンプ群13、及び信号変換回路群14とから構成されている。

【0014】磁気軸受制御回路10に入力される信号は、スラスト変位センサ21の検出信号に基づいて発生させられた垂直位置信号Z、第1ラジアル変位センサ22の検出信号に基づいて発生させられた第1位置信号のX軸成分信号 $X_h$ とY軸成分信号 $Y_h$ 、第2ラジアル変位センサ23の検出信号に基づいて発生させられた第2位置信号のX軸成分信号 $X_b$ とY軸成分信号 $Y_b$ である。更に、磁気軸受制御回路10には、振動センサ27の検出信号に基づいて発生させられた位置補正指令信号

$X_{10}$ と $X_{20}$ が入力されている。

【0015】磁気軸受制御回路10の出力信号は、スラスト軸受用電磁石31の駆動信号 $Z_+$ と $Z_-$ 、第1ラジアル軸受のX軸用電磁石の32Xの駆動信号 $X_{h+}$ と $X_{h-}$ 、第2ラジアル軸受のX軸用電磁石の33Xの駆動信号 $X_{b+}$ と $X_{b-}$ 、第1ラジアル軸受のY軸用電磁石の32Yの駆動信号 $Y_{h+}$ と $Y_{h-}$ 、第2ラジアル軸受のY軸用電磁石の33Yの駆動信号 $Y_{b+}$ と $Y_{b-}$ である。

【0016】信号変換回路14aは、X軸成分の位置信号を並行成分信号と傾斜成分信号に変換する回路である。信号変換回路14bは、Y軸成分の位置信号を並行成分信号と傾斜成分信号に変換する回路である。信号変換回路14cは、並行成分信号と傾斜成分信号を合成してX軸成分の位置信号に変換する回路である。更に、信号変換回路14dは、並行成分信号と傾斜成分信号を合成してY軸成分の位置信号に変換する回路である。

【0017】位相補償回路11aは、位置信号Zに位相補償を施す回路である。位相補償回路11bは、信号補償回路14aからの出力信号の並行成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号変換回路14cに印加する回路である。位相補償回路11cは、信号変換回路14aからの出力信号の傾斜成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号加算点15fに印加する回路である。位相補償回路11dは、信号変換回路14aからの出力信号の傾斜成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号加算点15gに印加する回路である。位相補償回路11eは、信号変換回路14bからの出力信号の並行成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号加算点15fに印加する回路である。位相補償回路11fは、信号変換回路14bからの出力信号の傾斜成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号加算点15gに印加する回路である。更に、位相補償回路11gは、信号変換回路14bからの出力信号の並行成分信号に位相補償を施し、その出力信号を信号変換回路14dに印加する回路である。

【0018】極性変換器12aはスラスト軸受のZ軸用電磁石駆動信号の極性変換器、極性変換器12bは第1ラジアル軸受のX軸用電磁石駆動信号の極性変換器、極性変換器12cは第2ラジアル軸受のX軸用電磁石駆動信号の極性変換器、極性変換器12dは第1ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号の極性変換器、更に、極性変換器12eは第2ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号の極性変換器である。

【0019】パワーアンプ13aはスラスト軸受のZ軸用電磁石駆動信号 $Z_+$ を出力する電力増幅器、パワーアンプ13bはスラスト軸受のZ軸用電磁石駆動信号 $Z_-$ を出力する電力増幅器である。パワーアンプ13cは第1ラジアル軸受のX軸用電磁石駆動信号 $X_{h+}$ を出力する電力増幅器、パワーアンプ13dは第1ラジアル軸受

のX軸用電磁石駆動信号 $X_{h-}$ を出力する電力増幅器である。パワーアンプ13eは第2ラジアル軸受のX軸用電磁石駆動信号 $X_{b+}$ を出力する電力増幅器、パワーアンプ13fは第2ラジアル軸受のX軸用電磁石駆動信号 $X_{b-}$ を出力する電力増幅器である。パワーアンプ13gは第1ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号 $Y_{h+}$ を出力する電力増幅器、パワーアンプ13hは第1ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号 $Y_{h-}$ を出力する電力増幅器である。更に、パワーアンプ13iは第2ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号 $Y_{b+}$ を出力する電力増幅器、パワーアンプ13jは第2ラジアル軸受のY軸用電磁石駆動信号 $Y_{b-}$ を出力する電力増幅器である。

【0020】図3は、2つの振動信号に基づいて発生させられた補正指令信号が5つの位置補正指令信号である。場合の制御部の一実施形態であり、図1の磁気軸受制御回路10の構成をより詳細に示したブロック回路図である。図3に示す如く、5軸制御用の磁気軸受制御回路10は、位相補償回路群11、極性変換器群12、パワーアンプ群13、及び信号変換回路群14とから構成されている。

【0021】図2と図3を比較すれば明らかな如く、両者は基本的には同じである。違いは、位置信号補正指令信号の磁気軸受制御回路10への印加の仕方にある。図2においては、2つの位置信号補正指令信号 $X_{10}$ 、 $X_{20}$ が磁気軸受制御回路10の位相補償回路群11の入力側にある信号加算点15bと15cに夫々印加されている。これに対して、図3においては、5つの位置信号補正指令信号 $Z_{10}$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{20}$ 、 $Y_{10}$ 、 $Y_{20}$ が磁気軸受制御回路10の位相補償回路群11の入力側にある信号加算点15a、15b、15c、15d、15eに夫々印加されている。

【0022】図4は、2つの振動信号に基づいて発生させられた補正指令信号が5つの力補正指令信号である場合の制御部の一実施形態であり、図1の磁気軸受制御回路10の構成をより詳細に示したブロック回路図である。図4に示す如く、5軸制御用の磁気軸受制御回路10は、位相補償回路群11、極性変換器群12、パワーアンプ群13、及び信号変換回路群14とから構成されている。

【0023】図3と図4を比較すれば明らかな如く、両者は基本的には同じであるが、磁気軸受制御回路10へ補正指令信号を印加する方法が異なる。図3においては、5つの位置信号補正指令信号 $Z_{10}$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{20}$ 、 $Y_{10}$ 、 $Y_{20}$ が磁気軸受制御回路10の位相補償回路群11の入力側にある信号加算点15a、15b、15c、15d、15eに夫々印加されている。これに対して、図4においては、5つの力補正指令信号 $Z_{20}$ 、 $X_{30}$ 、 $X_{40}$ 、 $Y_{30}$ 、 $Y_{40}$ が磁気軸受制御回路10の位相補償回路群11の出力側にある信号加算点15h、15i、15j、15k、15lに夫々印加されている。

【0024】図5は、2つの振動信号 $V_a$ と $V_b$ に基づいて5つの位置補正指令信号 $Z_{10}$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{20}$ 、 $Y_{10}$ 、 $Y_{20}$ を発生する補正指令発生回路28の一実施例のブロック回路図である。図5において、51は振動信号 $V_a$ と $V_b$ を変位信号に変換する振動／変位変換回路、52は振動／変位変換回路51の出力信号に所定の演算を施し位置補正指令信号 $Z_{10}$ 、 $X_{10}$ 、 $Y_{10}$ 、 $X_{20}$ 、 $Y_{20}$ を出力する演算回路、53はゲイン調整回路群である。更に、54は振動／変位変換回路51の振動／変位変換の演算に用いられるパラメータと、演算回路52の演算に用いられるパラメータが記憶されたパラメータ記憶回路である。

【0025】ゲイン調整回路群53において、53aはスラスト軸受のZ軸用電磁石を含むフィードバック回路に加えられる位置補正指令信号 $Z_{10}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路、53bは第1ラジアル軸受のX軸用電磁石を含むフィードバック回路に加えられる位置補正指令信号 $X_{10}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路、53cは第1ラジアル軸受のY軸用電磁石を含むフィードバック回路に加えられる位置補正指令信号 $Y_{10}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路、53dは第2ラジアル軸受のX軸用電磁石を含むフィードバック回路に加えられる位置補正指令信号 $X_{20}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路、更に、53eは第2ラジアル軸受のY軸用電磁石を含むフィードバック回路に加えられる位置補正指令信号 $Y_{20}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路である。

【0026】図6は、2つの振動信号 $V_a$ と $V_b$ に基づいて5つの力補正指令信号 $Z_{20}$ 、 $X_{30}$ 、 $Y_{30}$ 、 $X_{40}$ 、 $Y_{40}$ を発生する補正指令発生回路28の一実施例のブロック回路図である。図6の補正指令発生回路は、Z軸用力補正指令信号 $Z_{20}$ を出力する力補正指令発生部60a、 $X_h$ 軸用力補正指令信号 $X_{30}$ を出力する力補正指令発生部60b、 $Y_h$ 軸用力補正指令信号 $Y_{30}$ を出力する力補正指令発生部60c、 $X_b$ 軸用力補正指令信号 $X_{40}$ を出力する力補正指令発生部60d、 $Y_b$ 軸用力補正指令信号 $Y_{40}$ を出力する力補正指令発生部60e、及びこれらを駆動する共通のシーケンス回路67とから構成されている。

【0027】Z軸用力補正指令信号 $Z_{20}$ を出力する力補正指令発生部60aは、2つの振動信号 $V_a$ と $V_b$ に基づいて力補正指令信号 $Z_{20}$ を演算により求める演算回路61aと、力補正指令信号 $Z_{20}$ の増幅度を調整し、フィードバックの強さを設定するゲイン調整回路62a、演算回路61aに演算用パラメータを与えるパラメータ記憶回路63a、前記パラメータを演算により決定する伝達関数演算回路64a、及びゲイン調整回路62aの出力側にある信号加算点66aにパラメータ決定のための振

動信号を与える振動加振器65aとから構成されている。 $X_h$ 軸用力補正指令信号 $X_{30}$ を出力する力補正指令発生部60b、 $Y_h$ 軸用力補正指令信号 $Y_{30}$ を出力する力補正指令発生部60c、 $X_b$ 軸用力補正指令信号 $X_{40}$ を出力する力補正指令発生部60d、 $Y_b$ 軸用力補正指令信号 $Y_{40}$ を出力する力補正指令発生部60eも、Z軸用力補正指令信号 $Z_{20}$ を出力する力補正指令発生部60aと同様に演算回路とゲイン調整回路を含んで構成されている。

【0028】本発明を磁気軸受式ターボ分子ポンプに適用した場合に、補正指令発生回路28がどのようにして補正指令信号を発生するかについて、位置補正指令信号と力補正指令信号に分けて、以下に詳細に説明する。

【0029】図13に示す磁気軸受式ターボ分子ポンプにおいて、30は磁気軸受、31はスラスト軸受用電磁石、32は第1ラジアル磁気軸受用電磁石、33は第2ラジアル磁気軸受用電磁石、35は直流モータのステータコイル、36はロータである。スラスト軸受用電磁石31、第1ラジアル磁気軸受用電磁石32及び第2ラジアル磁気軸受用電磁石33は磁気軸受30のステータを構成する。また、37はターボ分子ポンプのフランジで、38は利用装置、例えば電子顕微鏡のフランジで、これらは回転機械と利用装置との接続部を形成している。更に、21はスラスト変位センサ、22は第1ラジアル変位センサ、23は第2ラジアル変位センサである。更にまた、27aは、ターボ分子ポンプのフランジ37に取付けられた第1振動センサ、27bは電子顕微鏡のフランジ38に取付けられた第2振動センサである。このように、ポンプのフランジ部37又は利用装置のフランジ部38の径方向の振動を低減させたい箇所に、加速度を検出し加速度信号を出力する振動センサ27aと27bが配置されている。

【0030】図13に示す如く設置されたセンサの位置関係を示せば、図11及び図12の通りである。即ち、第1ラジアル変位センサ22と第2ラジアル変位センサ23の間の距離は $L_1$ であり、第2ラジアル変位センサ23と第1振動センサ27aとの間の距離は $L_a$ であり、更に第2ラジアル変位センサ23と第2振動センサ27bとの間の距離は $L_b$ である。

【0031】このような配置関係において、図5の位置補正指令信号を発生する補正指令発生回路28の動作は以下の通りである。

【0032】振動／変位変換回路51は、加速度センサ27の出力信号である加速度信号を2回積分して変位信号 $X_a$ にする。図11に示す如く第1ラジアル変位センサ22と第2ラジアル変位センサ23の間の距離が $L_1$ 、第2ラジアル変位センサ23と第1振動センサ27aとの間が $L_a$ である。パラメータ記憶回路54には、これらの距離 $L_1$ と $L_a$ が予め演算用パラメータとして記憶されている。また図11において、 $X_{10}$ は第1ラ

ジアル変位センサ22の位置に換算した振動補正信号成分即ち第1位置補正指令信号、 $X_{20}$ は第2ラジアル変位センサ23の位置に換算した振動補正信号成分即ち第2位置補正指令信号、 $X_a$ は振動センサ27の変位信号である。

【0033】振動センサが1個の場合は、数式1の関係が成り立つように $X_{10}$ と $X_{20}$ を計算する。

【数1】

$$X_1 = \frac{L_2}{L_1} X_a + \frac{(L_1 - L_2)}{L_1} X_{20}$$

【0034】従って、 $X_{20}$ を用いなくて $X_{10}$ のみを用いる場合は、演算回路51は数式2に従って第1ラジアル変位センサ22の位置に換算した振動補正信号成分即ち第1位置補正指令信号 $X_{10}$ を算出する。

【数2】

$$X_{10} = \frac{L_1}{L_2} X_1$$

【0035】また $X_{10}$ を用いなくて $X_{20}$ のみを用いる場合は、演算回路51は数式3に従って第2ラジアル変位センサ23の位置に換算した振動補正信号成分即ち第2位置補正指令信号 $X_{20}$ を算出する。

【数3】

$$X_{20} = \frac{L_1}{(L_1 - L_2)} X_1$$

【0036】また、図12に示す如く2個の振動センサ27aと27bが用いられた場合、第1ラジアル変位センサ22と第2ラジアル変位センサ23との間の距離 $L_1$ 、第2ラジアル変位センサ23と振動センサ27との間の距離 $L_a$ 、第2ラジアル変位センサ23と振動センサ27との間の距離 $L_b$ は、パラメータ記憶回路54に予め演算用パラメータとして記憶されている。また、図12において、 $X_{10}$ は第1ラジアル変位センサ22の位置に換算した振動補正信号成分即ち第1位置補正指令信号、 $X_{20}$ は第2ラジアル変位センサ23の位置に換算した振動補正信号成分即ち第2位置補正指令信号、 $X_a$ は振動センサ27aの変位信号、 $X_b$ は振動センサ27bの変位信号である。

【0037】この場合、図8で $X_{20}$ 、 $X_{10}$ 、 $X_a$ 、 $X_b$ が一直線上に並ぶように、 $X_{20}$ と $X_{10}$ を求めればよい。

【0038】そこで、演算回路52は数式4に従って第1ラジアル変位センサ22の位置に換算した振動補正信号成分、即ち第1位置補正指令信号 $X_{10}$ を算出する。

【数4】

$$X_{10} = \frac{L_1 L_b - L_2 L_a}{L_1 - L_2} X_a$$

【0039】また、演算回路52は数式5に従って第2ラジアル変位センサ23の位置に換算した振動補正信号成分、即ち第2位置補正指令信号 $X_{20}$ を算出する。

【数5】

$$X_{20} = \frac{(L_1 - L_2) X_a}{L_1 - L_2}$$

【0040】図5の位置補正指令発生回路28の演算回路52は、X軸用の位置補正指令信号 $X_{10}$ と $X_{20}$ と同様に、Y軸用の位置補正指令信号 $Y_{10}$ と $Y_{20}$ 、並びにZ軸用の位置補正指令信号 $Z_{10}$ を算出する。

【0041】また、図10に示す如く、第1振動センサ27aの振動検出方向が磁気軸受のX軸方向とY軸方向のいずれとも一致しない場合、第1ラジアル変位センサ22の $X_1$   $Y_1$ 平面上でX軸方向と振動検出方向とのなす角度を $\theta$ とし、振動センサ27aの振動信号を $V_a$ とすると、X軸方向成分 $V_{ax}$ とY軸方向成分 $V_{ay}$ は以下の数式6と数式7で夫々求められる。

【0042】

【数6】

$$V_{ax} = V_a \cos \theta$$

【0043】

【数7】

$$V_{ay} = V_a \sin \theta$$

従って、図5のパラメータ記憶回路54には、X軸方向と振動検出方向とのなす角度 $\theta$ が記憶される。

【0044】次に、図6の力補正指令信号を発生する補正指令発生回路28の動作について以下に説明する。図6において、力補正指令信号は $Z_{20}$ 、 $X_{30}$ 、 $Y_{30}$ 、 $X_{40}$ 、 $Y_{40}$ として5つの軸毎に示してあるが、説明を複雑にしないために、以下の説明は入力と出力を一般化して数式を表示してある。また、力補正指令発生部のいずれかを特定した説明ではないので、構成回路の符号は添え字を省いてある。

【0045】図6において、シーケンス回路67によって、磁気軸受起動時に各回路に信号を送り以下のように動作させる。信号加振器65から伝達関数を測定したい周波数の加振信号を発生させる。加振信号は、力補正指令信号に加算され、磁気軸受を振動させる。この時、力補正指令信号 $F(s)$ と振動信号 $X(s)$ との間の伝達関数 $G(s)$ 、即ち数式8で表される伝達関数 $G(s)$ を伝達関数演算回路64で求める。

【数8】

$$G(s) = \frac{F(s)}{X(s)}$$

【0046】この伝達関数 $G(s)$ の高次の項、例えば3次以上を切り捨てると、数式9で表される。数式9の演算が終了した時点で信号加振器を停止させる。

【数9】

$$G(s) = \frac{B_2 s^2 + B_1 s + B_0}{A_2 s^2 + A_1 s + A_0}$$

【0047】この時、デジタル信号処理技術を用い、連続時間系の伝達関数 $G(s)$ を離散時間系の伝達関数 $G(z)$ に変換しておくと、数式10の伝達関数 $G(z)$ が求まる。

## 【数10】

$$G(z) = \frac{D_2 z^{-2} + D_1 z^{-1} + D_0}{C_2 z^{-2} + C_1 z^{-1} + C_0}$$

【0048】パラメータ記憶回路63には、数式10の係数 $C_2$ 、 $C_1$ 、 $C_0$ 、 $D_2$ 、 $D_1$ 、 $D_0$ が記憶される。従って、演算回路61はこれらのパラメータを用いて、デジタルフィルタ演算を実行し、力補正指令信号 $F_c$ を算出する。

【0049】また図示しないが、図6の信号振動器と伝達関数演算回路を用いなくて、力補正指令信号を生成する補正指令発生回路28を構成することもできる。これは、構造体のパラメータを予め実測又は計算で求めておくことにより、図6の信号加振器と伝達関数演算回路を不要としたものである。以下、この力補正指令発生回路28の動作を一般的に説明する。

【0050】振動センサ27の設置部位での変位を $X$ とし、外力 $F$ と変位 $X$ との関係を一般的な二次式で近似したものは数式11の通りである。即ち、外力 $F$ は、振動センサ27の設置部位における振動信号の加速度の $M$ 倍と振動信号の速度の $D$ 倍と変位の $K$ 倍を合計したものと表される。

## 【数11】

$$F = M \frac{d^2 X}{dt^2} + D \frac{dX}{dt} + KX$$

【0051】数式11における係数 $M$ 、 $D$ 、 $K$ を実測テスト又はシミュレーション計算等で予め求め、パラメータ記憶回路に入力しておく。次に、振動センサ27の振動信号から対応する加速度信号、速度信号及び変位信号を生成する。例えば、振動センサが加速度センサである場合、振動信号は加速度信号であるから、対応する速度信号は前記加速度信号を1回積分して求め、対応する変位信号は前記加速度信号を2回積分して求める。また、振動センサが速度センサである場合、振動信号は速度信号であるから、対応する加速度信号を前記速度信号を1回微分して求め、対応する変位信号は前記速度信号を1回積分して求める。勿論、振動センサ27を加速度信号、速度信号及び変位信号を夫々出力するセンサとしてもよい。

【0052】このようにして求めた加速度信号、速度信号及び変位信号、及びパラメータ記憶回路に記憶されている係数 $M$ 、 $D$ 、 $K$ に基づいて、演算回路52は数式12の演算を行って力補正指令信号 $F_c$ を算出する。

## 【数12】

$$F_c = M \frac{d^2 X}{dt^2} + D \frac{dX}{dt} + KX$$

【0053】以上、図6の力補正指令信号を発生する補正指令発生回路28の動作について入力と出力を一般化して数式を用いて説明した。実際には、夫々が演算回路とゲイン調整回路とからなる力補正指令発生部60a、60b、60c、60d及び60eが、上述の一般化して数式を用いて力補正指令信号 $Z_{20}$ 、 $X_{30}$ 、 $Y_{30}$ 、 $X_{40}$ 、 $Y_{40}$ を夫々算出して出力することになる。

【0054】ところで、図5及び図6の回路において、各ゲイン調整回路でゲイン調整された信号をそのまま補正指令信号として出力している。しかしながら、振動フィードバック回路が発振しにくくなるように信号の位相を調整するPID補償回路と、低減したい周波数成分だけを通過させ、不要な信号をカットするバンドパスフィルタ回路を、図5や図6の回路に追加してもよい。このようにすることで、振動フィードバック回路がより安定する。

【0055】また、振動信号が極端に大きい場合、これに基づく大きな補正信号が磁気軸受に入力され、ロータを大きく移動させようとする。ところが、ロータが保護用タッチベアリングに接触しないで動ける距離は通常1mm以下で非常に狭い。このため、上述の如く、ロータを大きく移動させると回転中のロータが保護用タッチベアリングに接触して、保護用タッチベアリングの寿命が短縮されてしまう。また、このような接触が起こると、大きな振動が発生してしまう。そこで、本発明においては、図7に示す振幅リミット回路を、補正指令発生回路の出力側と、磁気軸受制御回路との間に挿入し、上述の問題を解決した。即ち図7に示す振幅リミット回路は、リミット回路71と、積分回路72と、整流平滑回路73とで構成されている。図7に示す振幅リミット回路は、図8及び図9を参照すれば明らかな如く、大きな振動を予め定めた上限値に制限するように動作する。

【0056】以上、本発明の実施形態について詳細に説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されるものではないことは勿論である。特に、振動センサが設置される場所を磁気軸受装置を備える回転機械と利用装置との接続部とし、具体的には磁気軸受装置を備える回転機械のフランジ部又は利用装置のフランジ部とした実施形態を説明したが、前記接続部は夫々のフランジ部に隣接する回転機械又は利用装置の固定部も当然に含むものである。

## 【0057】

【発明の効果】本発明により、磁気軸受から少し離れた特定の場所、特に磁気軸受装置を備える回転機械と電子顕微鏡等の利用装置との接続部の振動を、従来より確実に低減することができるようになった。そのため、電子顕微鏡や半導体描画装置のように振動が性能悪化の原因になるような利用装置に、本発明に係る磁気軸受装置を備える回転機械、例えばターボ分子ポンプを用いた場合、電子顕微鏡や半導体描画装置の画像の解像度向上が可能になった。

## 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態のブロック構成図である。

【図2】位置補正指令信号が加えられた一実施形態の磁気軸受制御回路のブロック構成図である。

【図3】位置補正指令信号が加えられた他の一実施形態の磁気軸受制御回路のブロック構成図である。



【図4】力補正指令信号が加えられた一実施形態の磁気軸受制御回路のブロック構成図である。

【図5】位置補正指令発生回路の一実施形態のブロック構成図である。

【図6】力補正指令発生回路の一実施形態のブロック構成図である。

【図7】振幅リミッタ回路の一実施形態のブロック構成図である。

【図8】振幅リミッタ回路の入力信号波形と出力信号波形を示した図である。

【図9】振幅リミッタ回路の入出力特性図である。

【図10】振動センサの設置位置と振動検出方向との関係を示した図である。

【図11】振動センサが1個の場合の変位センサとの配置関係を示した図である。

【図12】振動センサが2個の場合の変位センサとの配置関係を示した図である。

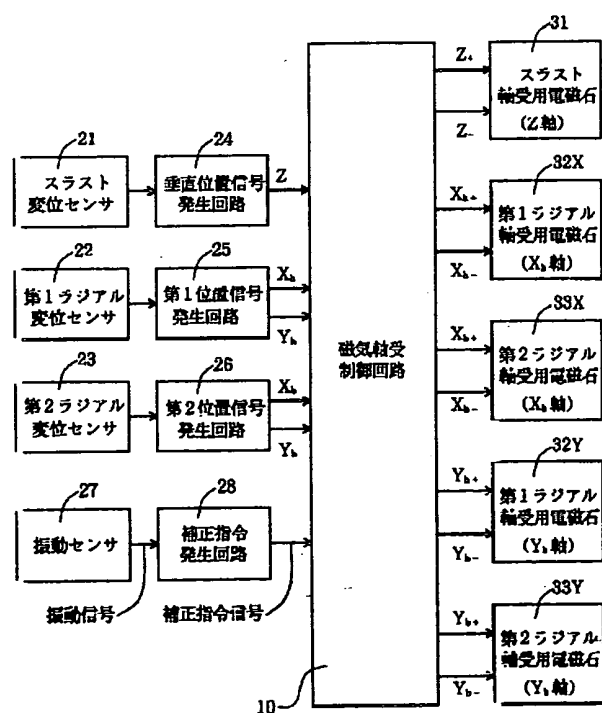
【図13】本発明が適用されたターボ分子ポンプの一例の断面図である。

【符号の説明】

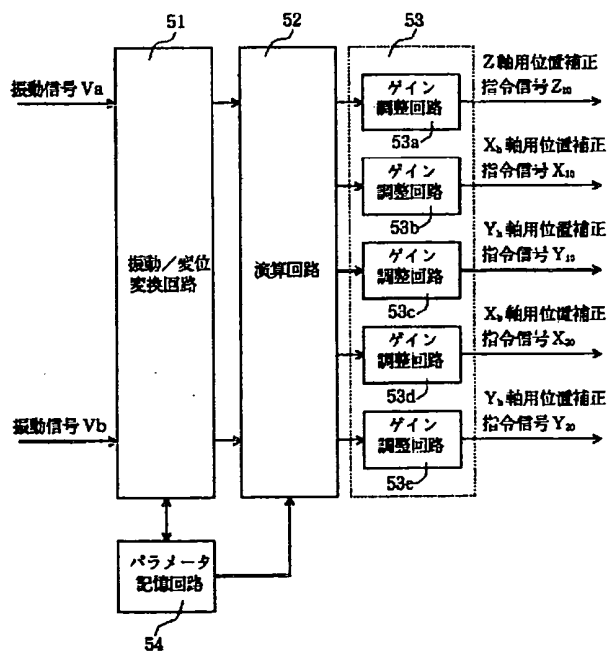
- 10 磁気軸受制御回路
- 11 位相補償回路
- 12 極性変換器
- 13 パワーアンプ
- 14 信号変換回路
- 15 信号加算点
- 21 スラスト変位センサ
- 22 第1ラジアル変位センサ
- 23 第2ラジアル変位センサ
- 24 垂直位置信号発生回路
- 25 第1位置信号発生回路
- 26 第2位置信号発生回路
- 27 振動センサ
- 28 補正指令発生回路

- 23 第2ラジアル変位センサ
- 24 垂直位置信号発生回路
- 25 第1位置信号発生回路
- 26 第2位置信号発生回路
- 27 振動センサ
- 28 補正指令発生回路
- 30 磁気軸受
- 31 スラスト軸受用電磁石
- 32 第1ラジアル軸受用電磁石
- 33 第2ラジアル軸受用電磁石
- 35 モータのステータコイル
- 36 ロータの回転軸
- 37 ターボ分子ポンプのフランジ
- 38 電子顕微鏡のフランジ
- 51 振動／変位変換回路
- 52 演算回路
- 53 ゲイン調整回路
- 54 パラメータ記憶回路
- 61 演算回路
- 62 ゲイン調整回路
- 63 パラメータ記憶回路
- 64 伝達関数演算回路
- 65 信号加振器
- 66 信号加算点
- 67 シーケンス回路
- 71 リミッタ回路
- 72 積分回路
- 73 整流平滑回路

【図1】

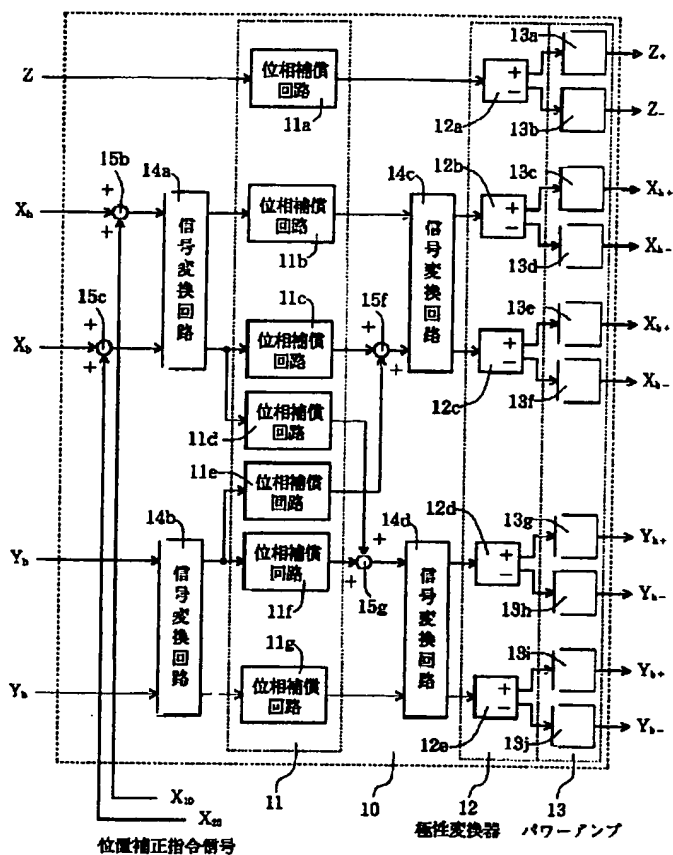


【図5】

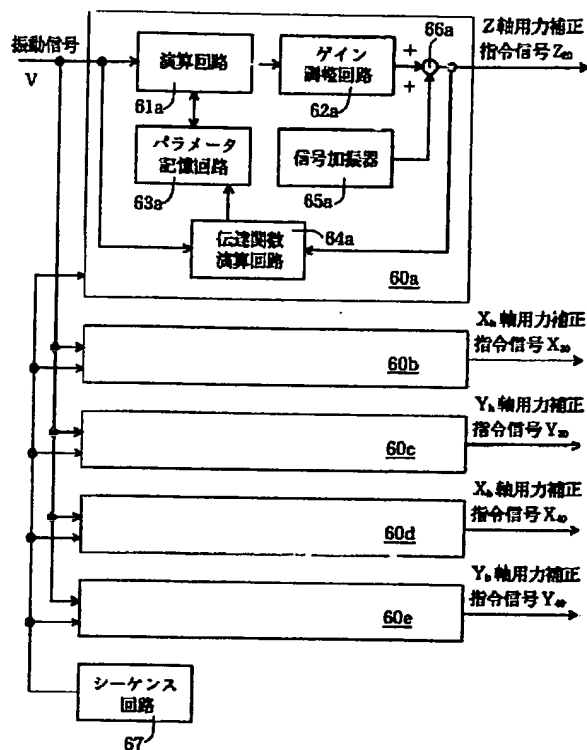




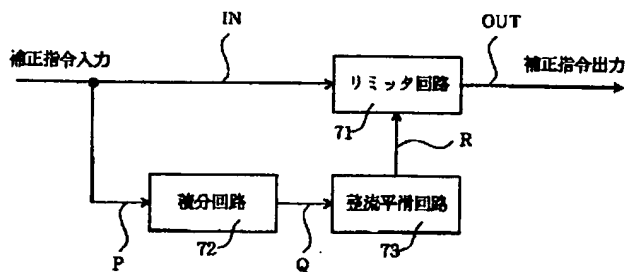
【図2】



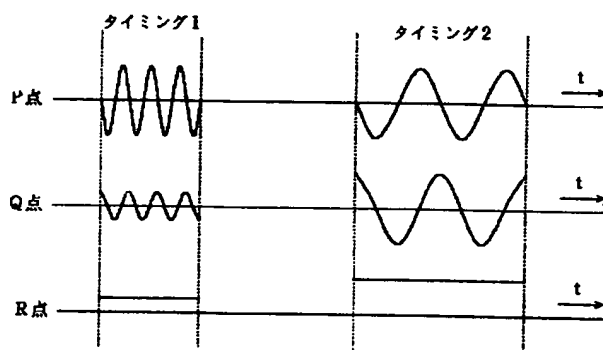
【図6】



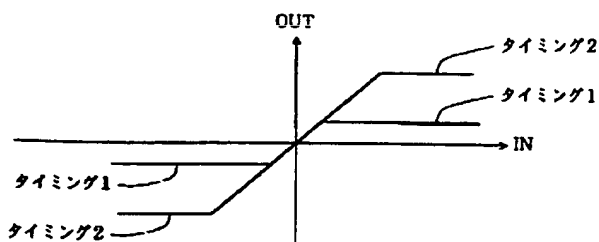
【図7】



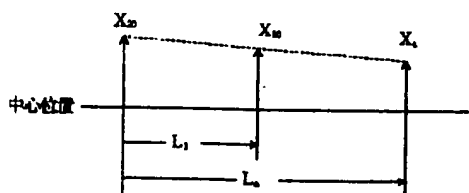
【図8】



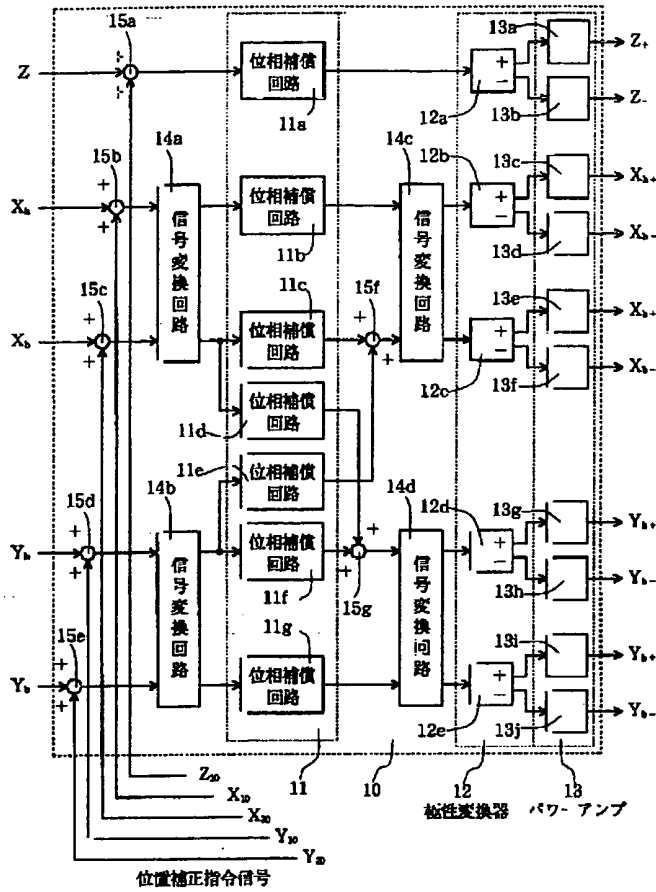
【図9】



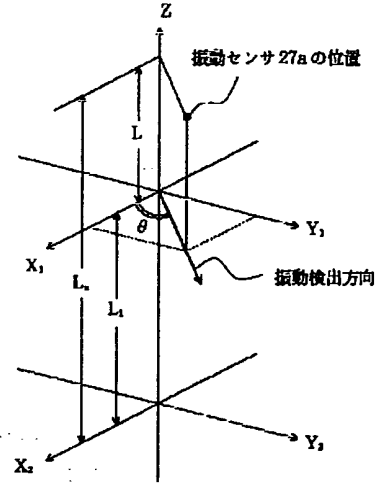
【図11】



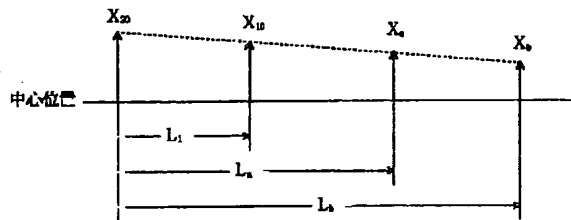
【図3】



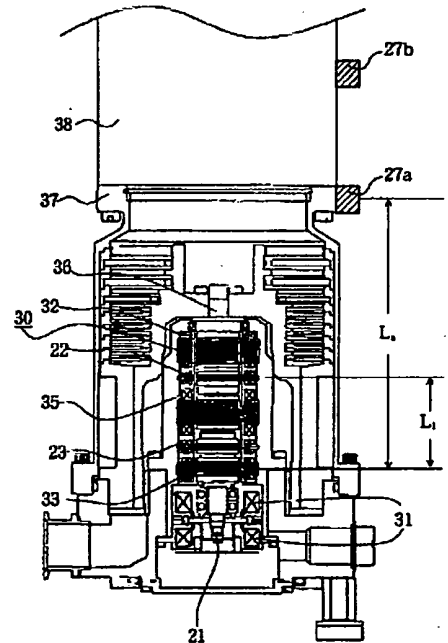
【図10】



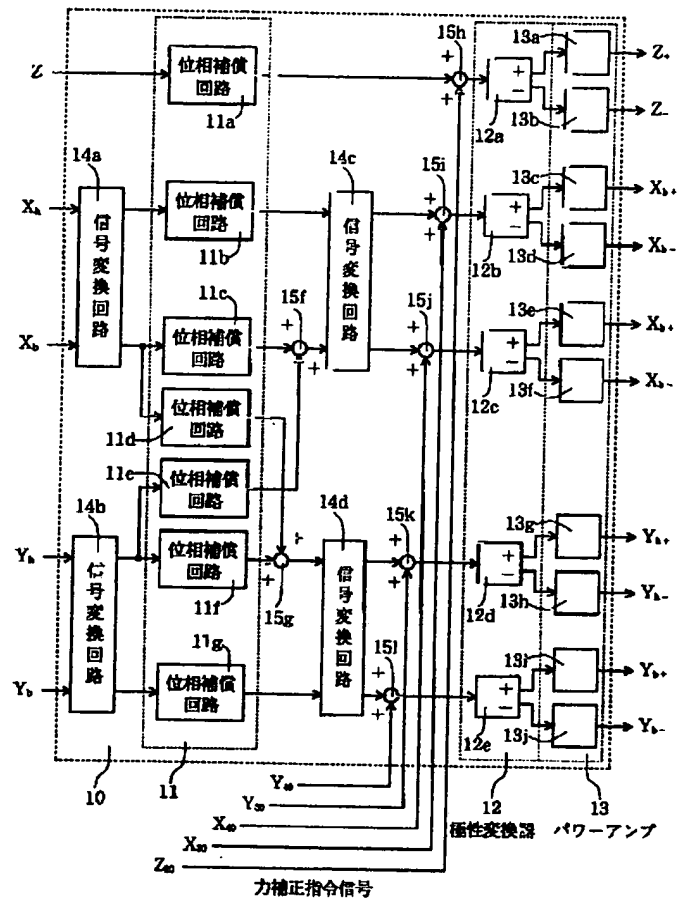
【図12】



【図13】



【図4】



フロントページの続き

(51)Int. Cl.<sup>7</sup>

F16F 15/03

G05D 19/02

識別記号

F I

F16F 15/03

G05D 19/02

(参考)

J

D

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**